第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

洪水漫溢对塔里木河中游河岸胡杨林土壤有机碳及活性组分的影响

马继龙[1,2,3]， 史军辉[2,3]， 王新英[2,3]， 阿丽亚·拜都热拉[1]，
刘茂秀[2,3]， 艾吉尔·阿不拉[2,3]

(1. 新疆农业大学林学与风景园林学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆林科院造林治沙研究所,新疆 乌鲁木齐 830063; 3. 新疆塔里木河胡杨林生态系统国家定位观测研究站,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘 要：塔里木河生态输水使流域两岸洪水漫溢强度增加,进而对河岸胡杨林生态系统碳循环产生了重要影响。以塔里木河中游周期性洪水漫溢区胡杨林为研究对象,测定并分析河岸胡杨林洪水漫溢过程中漫溢前(W1)、漫溢第4 d(W2)、漫溢第17 d(W3)和退水后(W4)4个不同阶段1 m土体有机碳及活性组分含量的变化特征。结果表明:(1) SOC(土壤有机碳)含量在漫溢前均高于漫溢后;洪水漫溢对0~20 cm土层SOC含量的影响较20~100 cm土层显著;在同一阶段内,随着土层的深入,SOC含量呈降低趋势。(2) 0~10 cm及40~100 cm土层的土壤DOC(可溶性有机碳)、MBC(微生物生物量碳)含量在漫溢第4 d较漫溢前均显著升高,但随着漫溢时间的延长,其含量逐渐降低,且各阶段间差异显著($P<0.05$);同一土层随漫溢时间的延长DOC/SOC、MBC/SOC差异显著($P<0.05$)。(3) 漫溢前0~10 cm土层EOC(易氧化有机碳)含量高于漫溢后,其他土层EOC含量则表现为漫溢期高于漫溢前及退水后;0~10 cm、20~60 cm土层EOC/SOC在不同漫溢阶段间差异显著($P<0.05$)。(4) 漫溢前至漫溢第17 d SOC与DOC含量呈极显著正相关($r>0.69$, n=15),退水后EOC和DOC呈显著正相关(r=0.54, n=15),漫溢前SOC和DOC含量与漫溢后各阶段含量之间相关性显著。综上所述,塔里木河中游洪水漫溢过程对河岸胡杨林SOC及活性组分分布产生了显著影响,并且各组分的敏感土层不同,SOC以0~20 cm土层影响最为显著,DOC、MBC以0~10 cm及40~100 cm土层影响最为显著,EOC则为20~60 cm土层影响最为显著,其变化规律具有森林和湿地的双重特征。

关键词：河岸胡杨林; 洪水漫溢; 土壤有机碳; 活性组分; 分布特征; 塔里木河

森林土壤碳库是陆地生态系统中最大的有机碳库[1],土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)是土壤肥力的关键属性,常被认为是评价土壤质量的关键指标[2]。土壤活性有机碳对外界因素较敏感[3],通常用微生物生物量碳(microbial biomass carbon,MBC)、易氧化有机碳(easily oxidizable organic,EOC)和可溶性有机碳(dissolved organic carbon,DOC)3个重要指标来表征[4]。土壤微生物作为生态系统中的重要分解者,对干旱区碳循环起着重要作用[5],而SOC则是生态系统稳定性的基础[6]。SOC的数量和形态,显著影响其在土壤中的转化,与全球碳循环特别是全球气候变化密切相关,为现代土壤学、环境科学等学科的研究热点[7]。

水文条件是土壤碳蓄积的关键调控因子,水文周期、水位梯度、降雨等水分输入和输出过程都会影响土壤中有机碳储量[8]。水文过程会改变土壤微生物的活性及群落组成[9]和土壤团聚体结构[10]等,从而改变陆地生态系统碳循环。降水的变化改变森林凋落物的输入和土壤呼吸速率,进而影响森林土壤有机碳动态平衡。在雨季,强降水过后,巴西亚马逊河流域东部森林、陆地菲尔梅森林(Terra Firme Forest)、法国圭亚那赤道低地雨林等森林土壤呼吸受到明显抑制及土壤CO_2通量迅速降低[11-13]。而在旱季,强降水过后,森林土壤呼吸作用及土壤CO_2排

收稿日期：2023-01-09; **修订日期：**2023-05-06
基金项目：自治区公益性科研院所基本科研业务费专项(KY2019047);自治区公益性科研院所基本科研业务费专项(KY2019049)
作者简介：马继龙(2000-),男,硕士研究生,主要从事荒漠化防治方向研究. E-mail: mjl4ever888@163.com
通讯作者：史军辉. E-mail: junhui_shi@sohu.com

放量都将显著增加[14-15]。淹水导致养分释放及沉积突然增加,使土壤碳库性质发生变化[16],周期性淹水改变了SOC在土壤中的重新分配,有机碳的不完全分解和厌氧条件导致有机碳腐殖化过程减少[17],同时,水淹频率直接影响湿地SOC及其活性组分[18]。季节性水位波动是河岸带的普遍现象,其将导致土壤形成有氧和厌氧环境,对碳矿化过程有非常复杂的影响[17],河岸带丰富的有机碳输入和输出成为自然界非常重要而又敏感的碳库[19],因此,水淹过程是影响和调控森林碳库特征的重要环境因素。与雨养林强降水形成的短期地表径流相比,塔里木河河岸胡杨林洪水漫溢过程表现为长时间大面积的周期性洪水漫溢,该过程对河岸森林土壤SOC及活性组分含量和分布特征的影响将呈现与雨养森林何种不同的规律,是本文研究的重点。

新疆塔里木河流域干旱荒漠区分布着 1.07×10^6 hm^2的胡杨林,是世界面积最大的分布区[20]。河岸胡杨林逐水而居,依水而生是其显著的特点。由于大面积、长时间、周期性的洪水漫溢,河岸胡杨林群落生长环境由土体转变为水体,土壤根系及土壤微生物生存环境从有氧环境转变为厌氧环境是其独特的生态水文特征。因而,河岸胡杨林是一类特殊的森林生态系统,具有森林、湿地、荒漠的特征。虽然,已有一些学者针对不同水文条件下SOC及其活性组分变化特征进行了研究,但多见于不同水分条件下平原湖泊、沼泽湿地或者室内控制水分实验[21-23]。也有学者在塔里木河流域针对退化生态系统恢复对土壤有机碳的影响进行了一些研究[24],但关于塔里木河河岸胡杨林洪水漫溢过程如何影响河岸林SOC及活性组分变化特征的研究鲜见报道,且对于洪水漫溢过程中SOC及活性组分动态规律的研究尚不明确。因此,本文选取土壤MBC、EOC和DOC作为表征SOC的动态指标,分析塔里木河中游河岸胡杨林洪水漫溢过程下,SOC及活性组分在不同层次土壤中的分布特征,为构建河岸胡杨林碳循环理论提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区位于新疆塔里木河中游轮台县轮南镇塔里木胡杨林自然保护区(84°15′~85°30′E,40°55′~41°15′N),地处塔克拉玛干沙漠北缘,总面积达3954 km^2,地势平坦,海拔800~940 m。气候类型为温带大陆性荒漠气候,平均气温9.7~10.8 ℃,年日照时数为2442~2925 h,年均降水量45.2 mm,主要集中在5—8月,潜在蒸发量高达1887~2910 mm,干热风和大风频繁。土壤以胡杨林土为主。植被类型主要以荒漠河岸林、盐生草甸为主,主要有胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)、铃铛刺(*Halimodendron halodeneron*)、琵琶柴(*Reaumuria songonica*)、芦苇(*Phragmites communis*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、蒿草(*Kobresia myosuroides*)等,其中胡杨和柽柳为建群种。

2 研究方法

2.1 样地设置

在国家林业和草原局塔里木河胡杨林生态系统定位观测研究站河岸胡杨林漫溢区设置典型永久性监测样地。样地位于国家重点公益林区,地理坐标为84°17′40″E,41°13′36″N,规格为100 m×100 m。在样地内垂直塔里木河北侧防洪堤修建钢木构架观测平台,观测平台由1条主通道和5条分支通道组成,主通道距地面3.0 m,分支通道距地面5.5 m,分支通道可通向不同的采样点,通道总长度为200 m;在样地周边安装高2.5 m的网状围栏,防止人为干扰及野生动物进入。样地内胡杨林郁闭度为0.81,平均高度13.2 m,平均胸径15.3 cm,平均冠幅为2.8 m×3.0 m。植被类型涵盖乔灌草三种类型,研究区内主要植被在样地内均有分布。土壤类型为胡杨林土。试验区当年来水时间为8月19日,10月初完全退水,漫溢深度最高达1.8 m。

2.2 样品采集

分别于洪水漫溢前(6月15日,W1)、漫溢第4 d(8月22日,W2)、漫溢第17 d(9月5日,W3)及退水后(10月8日,W4)4个阶段采集土壤样品。在样地内利用已搭建好的观测平台采用湿地取土专用钻进行样品采集。在样地内按照"品"字形布设3个采集样方,规格为30 m×30 m,每个样方内按照"S"形布设5个采样点,分5层0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm和60~100 cm,采集0~100 cm土壤样品。将每个样方中同层土样混合为一个样品,每份混合样约1.0 kg左右,每个阶段采集土壤样品15个,共采集4次,获取60份土样。土壤样品采集后立即分为

2份，一份放入液氮罐中带回实验室后放置在4 ℃冰箱中保存，用于测定MBC和DOC；另一份装入样品袋中带回实验室经过自然风干后过筛，用于测定SOC和EOC。土样密封保存并编号。

2.3 测定指标

土壤SOC采用重铬酸钾-外加热法测定[25]；DOC采用冷水浸提法测定[26]，将过2 mm筛的鲜土与蒸馏水以1:2.5的比例混合，振荡30 min后进行离心10 min(4000 r·min^{-1})，过0.45 μm的滤膜进行抽滤，用SOC仪测定滤液中的有机碳；EOC通过$KMnO_4$氧化法测定[27]，25 ℃下，将含有15~30 mg碳的土壤样品放入100 mL塑料瓶内，加入333 mmol·L^{-1}的$KMnO_4$液25 mL，密封瓶口，转速25 rpm振荡1 h，离心(4000 rpm)5 min，上清液用去离子水按1:250稀释后在565 nm分光光度计上比色，其标准液的浓度范围必须包括1 mg碳，根据$KMnO_4$的消耗量，即求出样品的活性有机碳含量；MBC采用氯仿熏蒸-K_2SO_4提取法测定[28]，称鲜土样20 g若干份，氯仿蒸汽熏蒸24 h，真空泵抽尽氯仿，土壤样品用0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4溶液100 mL浸提0.5 h；同时做未熏蒸处理的空白，测定浸提液中的有机碳，KC为转换系数，取值0.38。

2.4 数据处理

运用Microsoft Excel 2010和SPSS 19.0进行数据处理，采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)，分析河岸胡杨林洪水漫溢过程不同阶段SOC和活性组分及其比例的差异性，用Person相关系数表征SOC与土壤有机碳活性组分之间的相关关系，利用Origin 2021软件制图。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳分布特征

由河岸胡杨林洪水漫溢过程中0~100 cm土壤SOC分布特征(表1)可知，SOC含量变化在2.57~9.35 g·kg^{-1}之间；5个土层SOC含量都不同程度的受到洪水漫溢过程影响而发生改变，其中以0~10 cm和10~20 cm土层SOC变化最为明显。SOC含量在洪水漫溢前及退水后随着土壤深度的增加而降低，漫溢第4 d和第17 d垂直变化较小，除漫溢第17 d外，其他漫溢阶段均以0~10 cm土层SOC含量显著高于其他土层(P<0.05)。

对于0~10 cm土层，洪水漫溢前SOC含量最大，随着洪水漫溢过程SOC含量呈不规则的“U”型变化，漫溢前SOC含量显著高于漫溢第4 d及第17 d(P<0.05)；10~20 cm土层SOC含量随洪水漫溢过程呈“波浪”型变化，在漫溢第17 d达到最高；20~60 cm土层SOC含量呈现出与0~10 cm土层相同的变化规律，60~100 cm土层SOC含量随漫溢过程逐渐升高，同在漫溢第17 d达到最高。20~40 cm土层洪水漫溢前及退水后SOC含量显著高于漫溢第4 d及第17 d(P<0.05)，深层土壤(40~100 cm)SOC含量随洪水漫溢过程差异不显著。

3.2 土壤有机碳活性组分分布特征

3.2.1 土壤MBC分布特征 由河岸胡杨林洪水漫溢过程MBC分布特征(图1)可知，MBC含量在20.67~769.33 mg·kg^{-1}范围内，不同阶段MBC含量垂直分布变化规律较为明显，漫溢第4 d随土壤深度的增加呈不规则的“V”型变化；漫溢前、漫溢第17 d及退水后呈“波浪”型变化。不同阶段MBC含量最高值出现在不同土层，不同土层MBC含量差异显著(P<0.05)。表层(0~10 cm)及下层(40~100 cm)MBC含量随着地表积水从无至浅总体上显著升高，随着地表积水持续增加，MBC含量逐渐降低；中层(10~40 cm)MBC含量随着地表积水的增加逐渐降低，土壤表层(0~10 cm)和底层(60~100 cm)漫溢第4 d土

表1 河岸胡杨林洪水漫溢过程土壤有机碳含量

Tab. 1 Soil organic carbon content of riparian *Populus euphratica* forest during flooding

土层/cm	土壤有机碳含量/(g·kg^{-1})			
	W1	W2	W3	W4
0~10	9.35±1.10 Aa	4.32±1.01 Ba	4.02±1.72 Bab	6.91±2.30 ABa
10~20	4.91±2.83 Ab	3.60±0.96 Aab	5.76±2.72 Aa	3.92±0.49 Ab
20~40	3.71±0.45 Ab	2.71±0.38 Bb	2.64±0.36 Bb	3.54±0.18 Ab
40~60	2.95±0.53 Ab	2.70±0.20 Ab	2.57±0.24 Ab	3.33±0.51 Ab
60~100	2.73±0.53 Ab	2.79±0.21 Ab	3.32±0.20 Aab	3.01±0.29 Ab

注：表中数据为平均值±标准误差。同列数字不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，同行数据不同大写字母表示差异显著(P<0.05)。W1为漫溢前，W2为漫溢第4 d，W3为漫溢第17 d，W4为退水后。

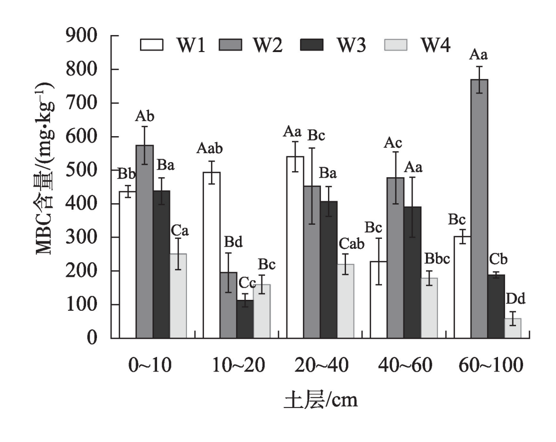
壤MBC含量显著高于其他漫溢阶段(P<0.05)。不同漫溢阶段MBC平均含量分别为367.67±36.34 mg·kg^{-1}、570.62±65.41 mg·kg^{-1}、289.80±36.18 mg·kg^{-1}、144.40±26.09 mg·kg^{-1}。

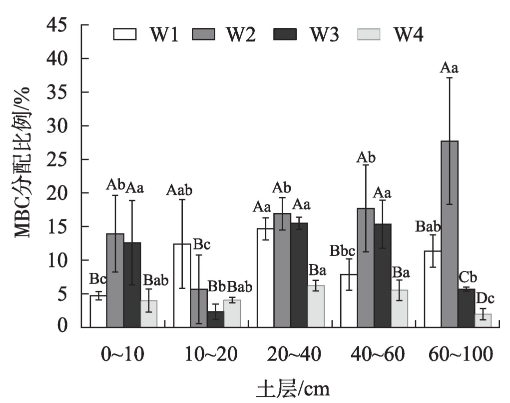
从土壤MBC分配比例(图1)来看，不同土层MBC占SOC的比例在1.98%~27.74%范围内，10~20 cm土层MBC/SOC随地表积水的增加不断下降，其他土层呈不规则的倒"U"型变化，除10~20 cm土层漫溢前MBC/SOC最高，其余土层均以漫溢第4 d达到最高，随着地表积水的增加MBC/SOC差异显著(P<0.05)。不同阶段MBC/SOC均值以漫溢第4 d最高，达19.98%。MBC/SOC随土壤深度的增加呈"波浪"型变化，不同土层间MBC/SOC差异显著(P<0.05)。

3.2.2　土壤EOC分布特征　由河岸胡杨林洪水漫溢过程EOC分布特征(图2)可知，EOC含量在0.20~2.54 g·kg^{-1}范围内，漫溢前和漫溢第4 d土壤EOC含量随着土壤深度的增加垂直变化较小，平均含量在2.14 g·kg^{-1}左右；漫溢第17 d及退水后不同土层间EOC含量差异显著(P<0.05)。EOC含量随着持续水淹时间的延长，0~20 cm土层不断下降，20~100 cm土层不断上升。20~60 cm土层不同漫溢阶段EOC含量差异显著(P<0.05)，其他土层无显著差异。不同漫溢阶段EOC平均含量分别为2.03±0.21 g·kg^{-1}、2.26±0.22 g·kg^{-1}、2.28±0.15 g·kg^{-1}、1.24±0.42 g·kg^{-1}。

从土壤EOC分配比例(图2)来看，不同土层EOC占SOC的比例总体上在6.25%~94.66%范围内，随水淹时间的延长EOC/SOC呈不规则的倒"U"型变化，除20~40 cm土层外，其余土层均在漫溢第4 d达到最高；除10~20 cm和60~100 cm土层外，其他土层随着水淹时间的延长EOC/SOC差异显著(P<0.05)。EOC/SOC随着土壤深度的增加总体上呈"波浪"型变化，不同土层间EOC/SOC差异显著(P<0.05)。

3.2.3　土壤DOC分布特征　由河岸胡杨林洪水漫溢过程DOC分布特征(图3)可知，DOC含量在45.90~

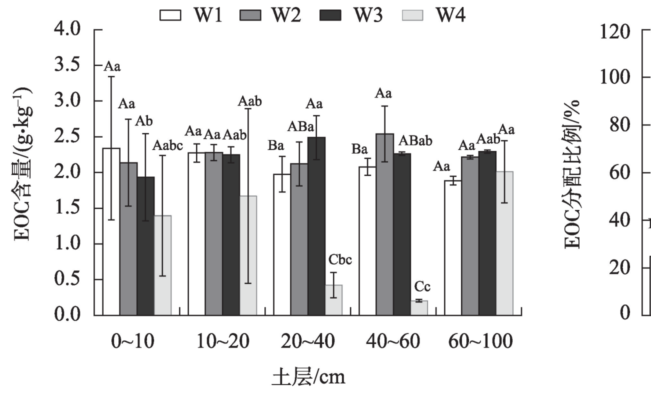




注：图中不同小写字母表示土层间差异显著(P<0.05)，不同大写字母表示不同漫溢阶段差异显著(P<0.05)。W1为漫溢前，W2为漫溢第4 d，W3为漫溢第17 d，W4为退水后。下同。

图1　河岸胡杨林洪水漫溢过程MBC分布特征及分配比例

Fig. 1　Distribution characteristics and distribution proportion of MBC in flood overflow process of riparian *Populus euphratica* forest



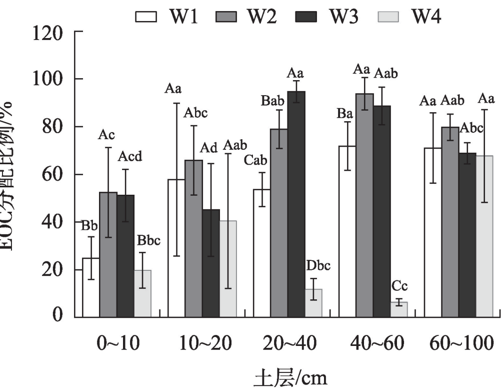


图2　河岸胡杨林洪水漫溢过程EOC分布特征及分配比例

Fig. 2　Distribution characteristics and distribution proportion of EOC in flood overflow process of riparian *Populus euphratica* forest

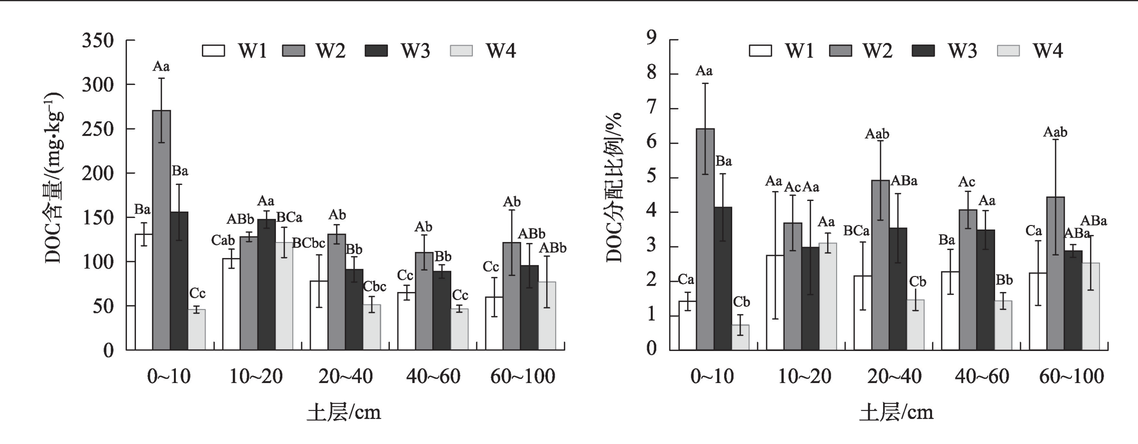


图3 河岸胡杨林洪水漫溢过程DOC分布特征及分配比例

Fig. 3 Distribution characteristics and distribution proportion of DOC in flood overflow process of riparian *Populus euphratica* forest

270.67 mg·kg^{-1}范围内，除退水后不同土层垂直分布特征不明显外，其他漫溢阶段DOC含量随着土壤深度的增加逐渐降低，且0~10 cm土层显著高于其他土层($P<0.05$)。水平方向上，随着地表积水深度的缓慢升高，不同土层DOC含量在升高后快速下降，不同洪水漫溢阶段DOC含量差异显著($P<0.05$)。不同漫溢阶段DOC平均含量分别为87.33±29.54 mg·kg^{-1}、152.22±66.69 mg·kg^{-1}、115.65±32.98 mg·kg^{-1}、68.54±32.28 mg·kg^{-1}。

从土壤DOC分配比例(图3)来看，不同土层DOC/SOC的比例总体上在0.73%~6.42%范围内，随着地表积水深度的缓慢升高DOC/SOC的比例变化规律与土壤MBC/SOC比例变化规律相似，但DOC/SOC比例均在漫溢第4 d达到最高，漫溢第4 d平均比例可达4.71%，除10~20 cm土层外，其他土层随着水淹时间的延长DOC/SOC比例差异显著($P<0.05$)。不同漫溢阶段DOC/SOC比例垂直剖面上与MBC/SOC比例变化规律相同，但变化差异趋势有所不同，除漫溢第4 d和第17 d外，其他漫溢阶段土层间DOC/SOC比例差异显著($P<0.05$)。

3.3 SOC及活性组分相关性

相关分析表明(表2)，河岸胡杨林洪水漫溢过程中，土壤有机碳及活性组分之间相关性在各阶段表现不一致。在洪水漫溢前、漫溢第4 d、第17 d时，SOC与DOC均呈极显著正相关(r=0.69，n=15；r=0.67，n=15；r=0.58，n=15)，退水后SOC与MBC呈显著正相关(r=0.54，n=15)，EOC和DOC呈显著正相关(r=0.54，n=15)。有机碳及同一碳组分含量在不同阶段之间的相关性也不同。漫溢前SOC含量和漫溢后各阶段土壤SOC含量显著正相关(漫溢第17 d除外)，漫溢前DOC含量与漫溢后各阶段DOC含量显著正相关(退水后期除外)，而漫溢前MBC和EOC含量与漫溢后各阶段MBC、EOC含量相关性不显著。

4 讨 论

在土壤中，有机质以DOC、颗粒态有机碳(POC)等形式进入水体，是土壤有机碳流失的重要方式[29]。湿地生态系统中，湿润环境有机碳含量高于淹水环境，表明淹水环境使相当一部分土壤有机碳随水流失，且对表层土壤有机碳影响最为明显，而深层有机碳含量沿水文梯度差异较小[30-31]。本研究中，河岸胡杨林洪水漫溢过程导致表层(0~10 cm)土壤有机碳流失明显；深层土壤有机碳含量趋于稳定，且漫溢第4 d湿润环境有机碳含量高于漫溢第17 d淹水环境(表1)。这表明河岸胡杨林洪水漫溢区土壤有机碳垂直分布具有湿地的特征。一般森林生态系统中，不同林分及不同林龄土壤有机碳含量随着土层深度的增加逐渐降低[32-33]，本文中河岸胡杨林土壤有机碳含量在洪水漫溢前和退水后随土层深度的增加而降低，呈现出与典型森林相同的规律[4,31]。而在漫溢第4 d及第17 d随土层深度的增加降低后出现了回升现象，呈现出与湿地相同的变化规律，原因是河岸胡杨林存在洪水漫溢这一特殊的水文过程，表层土壤有机质受到淋溶导致深层土壤(60~100 cm)SOC含量升高。总体上，河岸胡杨林漫溢前和退水后SOC含量高于漫溢第4 d和第17 d，主要是因为植物凋落物和动植物残体分解、代谢是SOC的主要来源[34]，而漫溢第4 d和第17 d由于积水导致

表2　河岸胡杨林洪水漫溢过程土壤SOC及活性组分相关性

Tab. 2　Correlation table of soil SOC and active components during flood overflow of riparian *Populus euphratica* forest

指标	W1 SOC	W1 MBC	W1 EOC	W1 DOC	W2 SOC	W2 MBC	W2 EOC	W2 DOC	W3 SOC	W3 MBC	W3 EOC	W3 DOC	W4 SOC	W4 MBC	W4 EOC	W4 DOC
W1 SOC	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W1 MBC	0.37	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W1 EOC	0.42	0.18	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W1 DOC	0.69**	0.38	0.23	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W2 SOC	0.61*	0.21	−0.10	0.72**	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W2 MBC	−0.06	−0.47	−0.10	−0.26	−0.19	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W2 EOC	−0.31	−0.57	0.30	−0.16	−0.29	−0.06	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
W2 DOC	0.84**	0.22	0.23	0.66**	0.67**	0.19	−0.34	1	–	–	–	–	–	–	–	–
W3 SOC	0.18	0.24	0.44	0.33	0.45	−0.36	0.17	0.10	1	–	–	–	–	–	–	–
W3 MBC	0.32	−0.01	−0.01	0.17	0.06	0.23	−0.13	0.42	−0.50	1	–	–	–	–	–	–
W3 EOC	−0.51	0.11	0.28	−0.44	−0.74*	−0.03	0.41	−0.63*	0.01	−0.14	1	–	–	–	–	–
W3 DOC	0.74**	0.44	0.64*	0.63*	0.45	−0.32	−0.13	0.57*	0.58*	−0.17	−0.29	1	–	–	–	–
W4 SOC	0.89**	0.24	0.47	0.64**	.637*	0.04	−0.26	0.88**	0.19	0.38	−0.53*	0.60*	1	–	–	–
W4 MBC	0.57*	0.40	0.06	0.63*	0.51	−0.35	−0.17	0.54*	−0.05	0.69**	−0.31	0.21	0.54*	1	–	–
W4 EOC	0.33	0.08	−0.03	0.18	0.46	0.15	−0.32	0.18	0.35	−0.51	−0.38	0.27	0.27	−0.24	1	–
W4 DOC	−0.09	0.27	0.05	0.08	0.18	−0.47	−0.02	−0.32	0.63*	−0.85**	0.04	0.31	−0.19	−0.37	0.54*	1

注:*表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上显著相关,n=15。W1为漫溢前,W2为漫溢第4 d,W3为漫溢第17 d,W4为退水后。

植物凋落物和动植物残体无法直接输入到土壤。因此,河岸胡杨林周期性洪水漫溢过程使其土壤有机碳垂直分布具有明显的湿地、森林生态系统双重特征。

土壤有机碳活性组分是SOC的重要组成部分,有机碳活性组分变化比SOC更加敏感,可以很大程度表征SOC含量的变化。MBC是土壤有机碳的重要组成部分,也是土壤重要的活性有机碳指标。研究表明,湿地短期的积水条件会促进微生物对土壤碳的利用,增强土壤微生物活性[35],在持续水淹环境中微生物生理活动受到氧的可获得性限制,会导致河岸林微生物量碳减少与土壤有机碳分解速率下降[36],地表无积水时,降水对MBC含量具有一定促进作用,但降水持续增加会明显降低MBC含量[21]。土壤MBC含量持续下降的原因除地表积水持续增加外,还因土壤中有机质被分解利用于满足动植物需要或者以DOC形式向水体中流失,而向土壤中输入的碳较少,可利用性碳量下降限制微生物数量和种类[37]。本研究中,河岸胡杨林土壤MBC含量从洪水漫溢前至漫溢第4 d,地表积水从无至浅,土壤MBC含量总体上显著升高,随着地表积水持续增加,土壤MBC含量逐渐降低(图1),与前人研究结果具有一致性。

EOC是有机碳中最先被氧化的部分,是土壤有机碳中周转最快的组分,也是土壤有机质动态变化的敏感性指标[38]。湿地表层土壤(0~20 cm)不同水淹持续时长,EOC含量变化呈从未水淹 > 水淹排空时间相近 > 水淹持续时间短 > 水淹持续时间长的规律,与未淹没的样地相比,EOC含量呈现不同程度的降低[39],本研究中,河岸胡杨林表层EOC含量从洪水漫溢前至漫溢第17 d,随着持续水淹时间的延长,土壤EOC含量逐渐下降,其中0~10 cm土层EOC含量随持续水淹时间的延长下降较为显著(图2),与湿地研究结果一致。另外,河岸胡杨林深层土壤EOC含量随持续水淹时间的延长而上升,造成这种现象的原因还有待进一步研究。

DOC是土壤微生物可直接利用的有机碳源,具有一定的溶解性,在土壤中移动较快,易分解矿化成二氧化碳释放到大气或随水流失[40]。地表径流缓慢时不足以对有机碳进行输出,强径流则会增加有机碳的流失[8]。较浅的积水会导致DOC含量升高,反之含量降低[41]。本研究中,河岸胡杨林不同深度土层DOC含量从洪水漫溢前至漫溢第4 d,随着土壤表面积水从无至浅,土壤DOC含量不断升高,随着后期积水深度不断增加,土壤DOC含量逐渐降低(图3),这与针对更新林和人工林的研究结

果一致[42]。随着土壤淋溶时间和强度的增加，土壤DOC含量持续下降，由于洪水漫溢过程中，存在一定深度的积水，使植物的凋落物不能有效输入到土壤中。

与SOC及其活性组分含量相比，有机碳活性组分分配比例更能反映土壤碳库的循环转化[43]。土壤MBC与SOC比值称为微生物熵，可以用作评价土壤过程力和土壤健康变化的有效指标[44]，反映土壤中微生物生物量碳的形成速率及有机碳库的周转变化速率[45]。在本研究中，河岸胡杨林漫溢第4 d微生物熵较高，表明短期积水条件下微生物活性较高，转化微生物生物量碳的速率快，可以形成更多的微生物生物量碳，这与在湿地的研究结果一致[22]。河岸胡杨林整个洪水漫溢过程微生物熵与微生物生物量碳变化具有较强的一致性，说明微生物熵随洪水漫溢过程变化是因为胡杨林河岸林土壤水环境变化对微生物种类和数量的影响实现的，这一点还有待深入研究。

土壤EOC占SOC比例，可以表明养分的循环速率以及土壤有机碳的活性[46]。河岸胡杨林3类不同的活性有机碳组分中，EOC所占SOC的比重最大，但是EOC所占SOC比例在不同漫溢阶段又表现出显著性差异，漫溢第4 d时EOC/SOC大于漫溢第17 d，因此，漫溢第4 d土壤具有较高的有机碳活性和转化率。这与湿地季节性水淹和极少水淹土壤EOC所占SOC比例显著大于常年水淹土壤的研究结果一致[47]。河岸胡杨林EOC分配比例随洪水漫溢过程降低，可能是水淹持续时间的延长使土壤还原环境增强，有机质被氧化的数量降低，导致土壤中EOC所占SOC比例降低。

常年水淹生境，土壤中的DOC更易流失，其土壤DOC占SOC的比例低于季节性水淹和极少水淹土壤[47]。本研究中，河岸胡杨林不同土层DOC占SOC比例随漫溢过程均表现出增大后减小的规律，并在漫溢第4 d达到最大。随着积水深度不断增加，水位不断波动，导致土壤中DOC不断流失，形成漫溢第17 d土壤DOC占SOC的比例低于漫溢第4 d。

5 结 论

通过对塔里木河中游河岸胡杨林周期性洪水漫溢过程中土壤有机碳及活性组分变化特征分析，得出以下结论：

（1）河岸胡杨林洪水漫溢使表层SOC流失明显；随着漫溢时间的延长，土壤有机碳活性组分含量及其分配比例均呈现出先增加后降低的变化趋势，说明短期漫溢促进土壤有机碳的分解周转，长时间的漫溢则有利于SOC的稳定性。

（2）SOC含量对洪水漫溢响应的敏感层次为0~20 cm，DOC、MBC为0~10 cm及40~100 cm土层，EOC则为20~60 cm土层，说明可选取上述土层作为指示层，开展洪水漫溢对土壤有机碳及活性组分影响的研究。

（3）河岸胡杨林洪水漫溢过程中SOC与DOC含量之间呈显著正相关，说明SOC含量很大程度上决定了DOC的含量，而DOC含量也可以反映SOC含量变化。

参考文献（References）：

[1] Fontaine S, Barot S, Barré P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007, 450(7167): 277–U10.

[2] 常帅, 于红博, 曹聪明, 等. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355–1366. [Chang Shuai, Yu Hongbo, Cao Congming, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in Xilin Gol steppe and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1355–1366.]

[3] Roldán A, Salinas-García J R, Alguacil M M, et al. Changes in soil enzyme activity, fertility, aggregation and C sequestration mediated by conservation tillage practices and water regime in a maize field[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 11–20.

[4] 杜雪, 王海燕. 中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J]. 世界林业研究, 2022, 35(1): 76–81. [Du Xue, Wang Haiyan. Active components of forest soil organic carbon and its influencing factors in China[J]. World Forestry Research, 2022, 35(1): 76–81.]

[5] 管海英, 赵鑫, 靳佳, 等. 荒漠生态系统土壤表层微生物量碳空间分布及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1125–1131. [Guan Haiying, Zhao Xin, Jin Jia, et al. Spatial patterns of soil microbial biomass carbon and factors influencing the distribution in a typical desert ecosystem[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(6): 1125–1131.]

[6] 史常明, 柳洋, 张富荣, 等. 焉耆盆地绿洲农田不同类型土壤有机碳空间分布特征及储量估算[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 672–681. [Shi Changming, Liu Yang, Zhang Furong, et al. Soil organic carbon spatial distribution and reserve estimation of different soil types in Yanqi Basin oasis area[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 672–681.]

[7] 张淑香, 张文菊, 徐明岗. 土壤活性有机碳的影响因素与综合分

析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1178-1179. [Zhang Shuxiang, Zhang Wenju, Xu Minggang. Influencing factors and comprehensive analysis of soil active organic carbon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(6): 1178-1179.]

[8] 侯翠翠. 水文条件变化对三江平原沼泽湿地土壤碳蓄积的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012. [Hou Cuicui. Effects of Hydrological Changes on Soil Carbon Sequestration of Marsh in the Sanjiang Plain[D]. Changchun: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2012.]

[9] Schimel J, Balser T C, Wallenstein M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. Ecology, 2007, 88(6): 1386-1394.

[10] Denef K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(12): 1599-1611.

[11] Sotta E D, Meir P, Malhi Y, et al. Soil CO_2 efflux in a tropical forest in the central Amazon[J]. Global Change Biology, 2004, 10(5): 601-617.

[12] Davidson E A, Verchot L V, Cattanio J H, et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 53-69.

[13] Buchmann N, Guehl J M, Barigah T S, et al. Interseasonal comparison of CO_2 concentrations,isotopic composition and carbon dynamics in an Amazonian rainforest(French Guiana) [J]. Oecologia, 1997, 110(1): 120-131.

[14] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28: 737-745.

[15] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 等. CO_2浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1023-1033. [Deng Qi, Zhou Guoyi, Liu Juxiu, et al. Effects of CO_2 enrichment, high nitrogen deposition and high precipitation on a model forest ecosystem in southern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1023-1033.]

[16] Blazejewski G A, Stolt M H, Gold A J, et al. Macro and micromorphology of subsurface carbon in riparian zone soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(4): 1320-1329.

[17] 张丹丹. 三峡水库消落区土壤有机碳动态格局与微生物学特征[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2020. [Zhang Dandan. Soil Organic Carbon Dynamic and Microbiological Characteristics in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences), 2020.]

[18] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 水淹频率增加对闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 974-980. [Gao Dengzhou, Zeng Congsheng, Zhang Wenlong, et al. Effects of increasing flooded frequency on soil organic carbon and its active composition in the Min River estuarine wetland[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(3): 974-980.]

[19] Sutfin N A, Wohl E E, Dwire K A. Banking carbon: A review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems[J]. Earth surface Processess and Landforms, 2016, 41(1): 38-60.

[20] 王新英, 史军辉, 刘茂秀, 等. 洪水漫溢对塔里木河中游天然胡杨林叶渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1544-1551. [Wang Xinying, Shi Junhui, Liu Maoxiu, et al. Effects of flood overtopping on leaf osmotic adjustment substances and antioxidant enzyme activities of natural *Populus euphratica* forest in the middle reaches of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1544-1551.]

[21] 袁继红, 任琼, 周莉荫, 等. 鄱阳湖湿地不同环境条件土壤有机碳组分特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1323-1329. [Yuan Jihong, Ren Qiong, Zhou Liyin, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon components under different environmental conditions in Poyang Lake wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(6): 1323-1329.]

[22] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 290-297. [Hou Cuicui, Song Changchun, Li Yingchen, et al. Seasonal dynamics of soil organic carbon and active organic carbon fractionsin calamagrostis angustifolia wetlands topsoil under different water conditions[J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 290-297.]

[23] 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 等. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1522-1528. [Wang Hongli, Xiao Chunling, Li Zhaojun, et al. Spatial variability of organic carbon in the soil of wetlands in chongming dongtan and its influential factors[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(7): 1522-1528.]

[24] 杨玉海, 李卫红, 李慧敏, 等. 塔里木河下游退化生态系统恢复对土壤有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 855-859. [Yang Yuhai, Li Weihong, Li Huimin, et al. Impacts of degraded ecological system restoration on soil organic carbon in inland basin of Tarim River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (4): 855-859.]

[25] 孙彩丽. 陕北退耕还林(草)的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [Sun Caili. Effect of Vegetation Restoration on Soil Cerbon Sequestrstion and Carbon Fractins in Northern Shanxi[D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2014.]

[26] Liang B C, Mackenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 26(2): 88-94.

[27] Wu J, O"Donnell A G, He Z L, et al. Fumigation-extraction method for the measurement of soil microbial biomass-S[J]. Soil Biology

& Biochemistry, 1994, 26(1): 117-125.

[28] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 393-406.

[29] Canarini A, Kiaer L P, Dijkstra F A. Soil carbon loss regulated by drought intensity and available substrate: A meta-analysis[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2017, 112(38-717): 90-99.

[30] 高俊琴, 徐兴良, 张锋, 等. 水分梯度对若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 126-131. [Gao Junqin, Xu Xingliang, Zhang Feng, et al. Distribution characteristics of soil labile carbon along water table gradient of alpine wetland soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 126-131.]

[31] 王棣, 耿增超, 佘雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5421-5429. [Wang Di, Geng Zengchao, She Diao, et al. Soil organic carbon storage and vertical distribution of carbon and nitrogen across different forest types in the Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5421-5429.]

[32] 侯浩, 张宋智, 关晋宏, 等. 小陇山不同林龄锐齿栎林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8025-8033. [Hou Hao, Zhang Songzhi, Guan Jinhong, et al. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests at different age stagesin the Xiaolongshan Mountains, Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8025-8033.]

[33] John L. Let the soil work for us[J]. Bioscience, 1997, 47(5): 321-322.

[34] 万忠梅. 水位对小叶章湿地CO_2、CH_4排放及土壤微生物活性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 465-468. [Wan Zhongmei. Effects of water level on CO_2 and CH_4 flux and soil microbial activity in Calamagrostis angustifolia marsh[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(3): 465-468.]

[35] Rinklebe J, Langer U. Microbial diversity in three floodplain soils at the Elbe River(Germany)[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(8): 2144-2151.

[36] Poret-Peterson A T, Ji B Engelhaupt E, Gulledge J. Soil microbial biomass along a hydrologic gradient in a subsiding coastal bottomland forest: Implications for future subsidence and sea-level rise [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(2): 641-645.

[37] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(4): 441-448.

[38] 张哲, 王邵军, 李霁航, 等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263. [Zhang Zhe, Wang Shaojun, Li Jihang, et al. Response of soil readily oxidizable carbon to community succession of Xishuangbanna tropicalforests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6257-6263.]

[39] 贾国梅, 牛俊涛, 席颖. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征[J]. 土壤, 2015, 47(5): 926-931. [Jia Guomei, Niu Juntao, Xi Ying. Characteristics of soil organic carbon and its fraction at riparian wetland of There Gorges Reservoir Area[J]. Soils, 2015, 47(5): 926-931.]

[40] Shao X X, Yang W Y, Wu M. Seasonal dynamics of soil labile organic carbon and enzyme activities in relation to vegetation types in Hangzhou Bay Tidal Flat Wetland[J]. PloS one, 2015, 10(11): 142677-142677.

[41] Briggs S V, Maher M T, Tongway D J. Dissolved and particulate organic carbon in two wetlands in southwestern New South Wales, Australia[J]. Hydrobiologia, 1993, 264(1): 13-19.

[42] 康根丽, 杨玉盛, 司友涛, 等. 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1946-1955. [Kang Genli, Yang Yusheng, Si Youtao, et al. Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1946-1955.]

[43] 张耀鸿, 王艳玲, 李仁英, 等. 互花米草入侵对潮滩土壤活性有机碳组分的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 102-106. [Zhang Yaohong, Wang Yanling, Li Renying, et al. Effects of spartina alterniflora invasion on active soil organic carbon in the coastal marshes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 102-106.]

[44] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2010, 6(3): 317-327.

[45] 张金波, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504. [Zhang Jinbo, Song Changchun. The sensitive evaluation indicators of effects of land-use change on soil carbon pool[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2003, 12(4): 500-504.]

[46] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523-526. [Zhu Zhijian, Jiang Peikun, Xu Qiufang. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation[J]. Forest Research, 2006, 19(4): 523-526.]

[47] 崔东, 闫俊杰, 刘海军, 等. 伊犁河谷不同类型湿地土壤活性有机碳组分及其含量差异[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2087-2093. [Cui Dong, Yan Junjie, Liu Haijun, et al. Soil labile organic carbon fractions and the differences of their concentrations in different types of wetlands in Yili valley[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7): 2087-2093.]

Effects of flood overflow on soil organic carbon and active components of *Populus euphratica* forest in the middle reaches of the Tarim River

MA Jilong[1,2,3], SHI Junhui[2,3], WANG Xinying[2,3],
Aliya BAIDOURELA[1], LIU Maoxiu[2,3], Aijier ABULA[2,3]
（1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Research Institute of Afforestation and Desertification Prevention and Control, Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Tarim Poplus euphratica Riparian Forest Ecosystem Research Station , Urumqi 830046, Xinjiang, China）

Abstract: The ecological water transport of the Tarim River increases flood intensity on both sides of the basin, which has an important effect on the carbon cycle of the riparian *Populus euphratica* forest ecosystems. We studied the *P. euphratica* forest in the middle reaches of the Tarim River and the content changes of organic carbon and measured and analyzed the active components of the riparian *P. euphratica* forest at four different stages (1 m before (W1); 4 days after (W2); 17 days after (W3); and after (W4)). We found that the soil organic carbon (SOC) content was higher before and after overflow. The effect of flood overflow on the SOC content in the 0−20 cm soil layer was more significant than that of the 20−100 cm soil layer. During the same stage, the SOC content decreased with soil layer depth. The dissolved organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) in the 0−10 cm and 40−100 cm soil layers were significantly increased on the 4th day of the overflow compared to before the overflow. The contents decreased gradually with the extension of the overflow time. The differences between each stage were significant ($P < 0.05$). The DOC/SOC and MBC/SOC in the same soil layer differed significantly as time since the overflow extended ($P < 0.05$). The extracted organic carbon (EOC) content in the 0−10 cm soil layer before the overflow was higher than after the overflow. The EOC content in other soil layers during the overflow period was higher than before or after the overflow. The EOC/SOC in the 0−10 cm and 20−60 cm soil layers were significantly different at each overflow stage ($P < 0.05$). There was a significantly positive correlation between SOC and DOC content from before the overflow to day 17 of the overflow ($r > 0.69$, $n = 15$) and a significantly positive correlation between EOC and DOC content after discharge ($r = 0.54$, $n = 15$). There was a significant correlation between SOC and DOC content before the overflow and at various stages after the overflow. Based on the above analysis, the flooding process in the middle reaches of the Tarim River had a significant effect on the distribution of SOC and the active components of the riparian poplar forest, with differences found in the sensitive soil layers of each component. SOC was most significant in the 0−20 cm soil layer. DOC and MBC were most significant in the 0−10 cm soil layer and the 40−100 cm soil layer, respectively, and EOC was most significant in the 20−60 cm soil layer. Thus, the observed change regularity has the dual characteristics of forest and wetland.

Keywords: riparian *Populus euphratica* forests; flooding; soil organic carbon; active composition; distribution characteristics; Tarim River